

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-331927

(P2000-331927A)

(43) 公開日 平成12年11月30日 (2000. 11. 30)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テ-マ-ト\* (参考)

H 0 1 L 21/027

H 0 1 L 21/30

5 1 6 A 2 H 0 8 7

G 0 2 B 13/24

G 0 2 B 13/24

2 H 0 9 7

G 0 3 F 7/22

G 0 3 F 7/22

H 5 F 0 4 6

Z

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2000-68536(P2000-68536)

(22) 出願日 平成12年3月13日 (2000. 3. 13)

(31) 優先権主張番号 特願平11-66538

(32) 優先日 平成11年3月12日 (1999. 3. 12)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子3丁目30番2号

(72) 発明者 畔野 靖行

東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤノ

ン株式会社内

(74) 代理人 100090538

弁理士 西山 恵三 (外2名)

Fターム(参考) 2H087 KA21 NA00 RA00 RA42 UA02

UA04

2H097 BA01 BA06 CA06 GB01 JA03

LA10 LA12

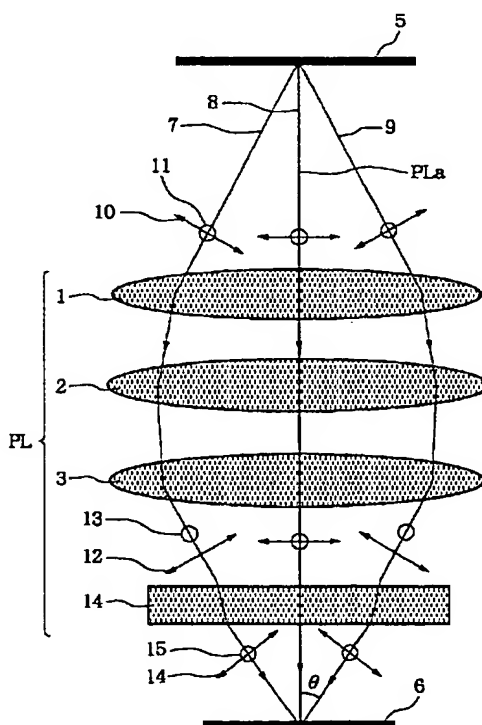
5F046 BA03 CB12 CB27 DA13

(54) 【発明の名称】 投影光学系及びそれを用いた投影露光装置

(57) 【要約】

【課題】 投影光学系に含まれる光学エレメントが有する複屈折性を補正して高解像度でパターンを結像すること。

【解決手段】 複数枚のレンズエレメント1, 2, 3を有する投影光学系PLに光軸方向に主軸を有する一軸結晶、及び/又は該一軸結晶と同等の歪み分布を有する材質より成る複屈折補正部材4を設け、この複屈折補正部材によって、複数枚のレンズエレメント1, 2, 3で発生する複屈折をキャンセルする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 1つ又は複数枚のレンズエレメントを有する投影光学系において、該投影光学系は光軸方向に主軸を有する一軸結晶より成る複屈折補正部材を少なくとも1つ及び／又は該一軸結晶と同等の歪み分布を有する材質より成る複屈折補正部材を少なくとも1つ含み、該複屈折補正部材の特性は、前記レンズエレメントの1つ又は複数枚で発生する複屈折をキャンセルするように決められることを特徴とする投影光学系。

【請求項2】 1つ又は複数枚のレンズエレメントを有する投影光学系において、該投影光学系は複屈折補正部材を少なくとも1つ含み、該複屈折補正部材の特性は、前記レンズエレメントの1つ又は複数枚で発生する複屈折をキャンセルするように決められることを特徴とする投影光学系。

【請求項3】 複数枚のレンズエレメントを有する投影光学系において、該投影光学系は複屈折可変部材を有することを特徴とする投影光学系。

【請求項4】 前記投影光学系は、像側がテレセントリックな構成であり、最も像側のエレメントとして第1の複屈折補正部材を有し、該投影光学系の絞り位置近辺に第2の複屈折補正部材を有することを特徴とする請求項1又は2の投影光学系。

【請求項5】 前記部材は平行平板であり、その厚さ及び複屈折的な特性は、前記複数のレンズエレメントで発生する複屈折をキャンセルするように決められていることを特徴とする請求項1から4のいずれか1項の投影光学系。

【請求項6】 前記部材の材質は $MgF_2$ の単結晶であり、 $MgF_2$ は複屈折性を有さない基板上に基板と一体化して設けられていることを特徴とする請求項5の投影光学系。

【請求項7】 前記部材の周辺部に複屈折補正量を調整するための応力調整手段を備えたことを特徴とする請求項5の投影光学系。

【請求項8】 前記部材の材質は $MgF_2$ の単結晶、或いは $CaF_2$ の単結晶、或いは熔融石英であり、その周辺部に応力調整手段を備えていることを特徴とする請求項5の投影光学系。

【請求項9】 前記請求項1乃至請求項8のいずれか1項に記載の投影光学系を用いて第1物体面上のパターンを第2物体面上に投影していることを特徴とする投影露光装置。

【請求項10】 前記請求項9記載の投影露光装置を用いてレチクルのデバイスパターンでウェハを露光する手段と、該露光したウェハを現像する段階とを含むことを特徴とするデバイス製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は半導体素子、CC

D、液晶デバイス等のデバイス製造用の投影光学系及びそれを用いた投影露光装置及びそれを用いたデバイスの製造方法に関するものであり、特にステップアンドリピート方式（ステッパ）やステップアンドスキャン方式（スキャナ）の投影露光装置において、投影光学系を構成する光学エレメント（硝材）が有する複屈折性の影響を補正し、高解像度のパターンを得る投影露光装置に好適なものである。

【0002】

【従来の技術】 最近、DRAM、CPU等の半導体素子の高集積化が顕著であり、最先端の素子（デバイス）においては $0.25\mu m$ 以下のサイズを有する回路パターンが必要とされている。そのような微細パターンを高精度に形成することが可能な装置として、所謂ステッパが広く用いられる。ステッパにおいては、レチクル上のパターンを紫外領域の短波長光で照明し、投影光学系を介してシリコン等の半導体ウェハ上に縮小投影することにより該ウェハ上に微細な回路パターンの形成を行っている。

【0003】 その際、レチクル上のパターンを高精度に転写するために投影光学系に対しては様々な厳しい条件が課せられている。投影光学系が解像することが可能なパターンサイズはNA（開口数）に反比例するため、NAをより大きくするために設計が必要となる。更に半導体チップの面積に対応する領域全体で高度に収差が補正されている必要がある。

【0004】 そのような設計は、高速なコンピュータと専用の設計ソフトウェアを用いて実現される。その投影光学系を製造する際には、投影光学系を構成する1枚1枚のレンズを設計値通りに高精度に加工する必要があるのは当然であるが、用いる硝材に対しても細心の注意を払う必要がある。硝材が有する屈折率は投影光学系の結像特性に深く関わってくるため、その均一性は非常に厳密に管理され通常は $10^{-6}$ 以下のオーダーに抑えられている。更には硝材の複屈折性も結像特性に大きな影響を与えるため、その大きさは $2nm/cm$ 程度に抑える必要があることが知られている。

【0005】 しかしながら、最大で直径が $300mm$ にも達する投影光学系用の硝材において、全面一様にそのような高精度の複屈折性の制御を行うのは非常に困難であり、以下に述べる理由により、通常はある程度の複屈折性が発生してしまう。

【0006】 理由の第1は、硝材の製造工程に起因するものである。紫外領域の光に対してはレンズエレメント用の硝材として現在のところ石英ガラスが広く用いられるため、ここらかの説明は石英ガラスを中心に行う。硝材として用いられる石英ガラスは、光学結晶等とは異なりその構造に方向性がないため、理想的な状態においては複屈折性は発生しない。

【0007】 しかしながら、石英ガラスにおいては不純

物、熱履歴等による残存応力に起因すると考えられる複屈折性が実験的に観測される。リソグラフィ用の高品質な石英ガラスの製造においては、ダイレクト法 (Direct Method)、VAD (vapor axial deposition) 法、ソルゲル (sol-gel) 法、プラズマバーナー (plasma burner) 法等が用いられるが、いずれの方法においても現状の技術で不純物の混入を無視できるレベルまで抑えるのは困難である。また、高温の状態で作成された石英ガラスを冷却する際に、表面と中心部の冷え方が異なることによる発生する応力、即ち熱履歴による応力はアニール等の熱処理によりある程度緩和することばできるものの、原理的に完全にゼロとすることが難しい。

【0008】図17を用いてリソグラフィ用投影光学系に用いられるレンズエレメントを作製する工程について説明する。まず石英ガラスのインゴット100が回転対称な形で形成され、それを必要な厚さで切断することによって円板状の部材101が得られる。インゴット100の製造は常に中心軸100aに関して対称に行われるため、部材101中に残存する不純物の分布、熱履歴による応力の分布も当然、中心軸101aに関して対称な形で現れる。最後に部材101に対して切削、研磨の加工を行うことによってレンズエレメント102が作られる。ここで、インゴット100に不純物が混入した場合に現れる歪みについて説明する。

【0009】図18はインゴット100の切断面を表し、周囲のハッチ部103で不純物濃度が高くなっているとする。インゴット100はアニーリングの過程において加熱される。そして熱が加わった状態では内部応力がほぼ完全にゼロとなり、その状態からゆっくりと冷却することにより、理想的には室温においても内部応力ゼロの材料が作られる。ところが不純物が混入すると材料の熱膨張率が変化する。不純物が混入することにより熱膨張率が增大すると、当然その部分は、冷却の過程において縮み方が大きくなる。そのため、加熱した状態で無応力だったものが温度を下げることでより周辺部がより大きく縮もうとする。光束が透過する硝材の中央部に着目すれば、図18中で矢印で示すような圧縮を周辺部から受けることになり、内部応力が発生してしまう。内部応力は複屈折性が生じる原因となる。

【0010】理由の第2は、石英ガラスをステッパ中で使用する際の経時変化に起因するものである。石英ガラスにKrF、ArFレーザー等の短波長光源からの光を照射すると、コンパクション (compaction) と呼ばれる現象が発生することが知られている。その発生過程の詳細に関する説明は省略するが、観察される現象としては、光束が透過した部分の屈折率が上昇し体積が収縮するというものである。

【0011】図19中で円板状の硝材110に対して斜線の領域111にレーザー光を照射すると、その部分の体

積が収縮しようとする。レーザー光が照射されない周辺部はもちろんコンパクションの影響は受けないから、全体としては、中心付近は収縮しようとして周辺付近はその収縮を阻止しようとする。そのため平衡状態においては、光束が透過する硝材の中央部に着目すれば、図20中で矢印で示すような引っ張りの力を周辺部から受けることになり、内部応力が発生してしまう。そして内部応力は複屈折性が生じる原因となる。上記の現象は、ステッパの投影光学系においても同様に発生する。ArFレーザー光に対してコンパクションの発生は特に顕著になるため、今後、ArFレーザー光を光源とする投影露光装置を実用化する上で大きな問題となることが危惧されている。

【0012】上述の通り、ステッパ用の投影光学系の硝材には、多くの場合、図21に示すように中心軸120aに関して対称な歪みが残存し、その結果複屈折が発生してしまう。図21中120は投影光学系に用いられる硝材であり、121等で示す線分は、その向きが複屈折による進相軸の方向を表し、その長さが複屈折の大きさに対応する。中心部120aでは複屈折ゼロであるが、周辺にいくに従って複屈折が大きくなる様子を示している。

【0013】図21のような硝材で光学系を構成した際に現れる影響を図22により説明する。ここでは3枚のレンズエレメント130～132で投影光学系を代表させる。物点Oと像点Iは共役な関係となっており、複屈折の影響を無視すれば完全に無収差の結像が実現される。ここで、3枚のレンズエレメント130～132はそれぞれ図20で示したような複屈折性を有すると仮定する。そして光軸上の光線133、レンズ周辺部を通る光線134、135の3本の光線を考えることによって複屈折の影響を説明する。

【0014】3本の光線それぞれに、物体空間での偏光状態を、紙面に垂直な成分136～138の紙面内部の成分139～141に分解して考える。そしてレンズ入射前では、偏光成分136と139、偏光成分137と140、偏光成分138と141に対応する波面はそれぞれ位相が揃っているとする。次にレンズ透過後の偏光状態を、紙面に垂直な成分142～144と紙面内部の成分145～147で表す。まず光線133は各レンズエレメントの中心を通るため複屈折の影響は受けずに、偏光成分142と145に対応する波面は一致したままである。ところが光線134と135はレンズエレメントの周辺部を通過するため、複屈折の影響が現れる。ここでは、入射前の偏光成分140と141が進相軸方向に一致するため、レンズエレメント透過後は、偏光成分146と147はそれぞれ偏光成分143、144よりも波面が進むことになる。

【0015】ここで、2つの偏光成分144と147 (或いは偏光成分143と146) 間の波面のずれφ

は、光線が光軸と成す角度を $\theta$ とした際、 $\theta$ の関数として図23のように表せる。関数形の詳細は、当然投影レンズの設計データ、及び硝材の複屈折特性に依存するが、基本的には $\theta$ の2次関数としての影響が最も強く現れる。

【0016】図22は投影レンズの1つの断面内における影響を示しているが、光軸上の物点を考える限りは実際の影響も光軸に関して対称に現れるので、図22によって複屈折の影響が代表されることになる。複屈折によって発生する波面への影響に関して、より詳細な説明は本発明者による論文Y. Unno, "Distorted wave front produced by a high-resolution projection optical system having rotation ally symmetric birefringence," Applied Optics, Vol. 37, No. 31, 1998, pp7241-7247に述べられている。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】硝材で発生する複屈折性を完全にゼロに抑えることは現実的に難しいにも関わらず、ステッパ用の投影光学系において複屈折に対する要求は益々厳しくなっている。図22は、偏光方向によって結像光の波面の形状が異なってしまうことを意味しており、複屈折の影響を考えない場合に比較して結像特性は劣化する。

【0018】また、より高性能の投影光学系を実現するために投影光学系を構成するレンズエレメントの枚数は増える傾向にあり、トータルな硝材の厚さが大きくなる。そのため単位長さ当りの複屈折量を上述の値(2nm/cm程度)に抑えたとしても、全体の複屈折量は無視し得ない大きさとなってしまう。更に、露光光源用の波長が益々短くなってきていることも、複屈折性の影響を増大させる方向に働く。

【0019】具体的に投影露光装置に使用されているi線光源(波長365nm)と、ArFレーザ光線(波長193nm)で比較してみる。例えば光学系全体で100nmの複屈折性があった場合、波長365nmのi線に対しては $100/365=0.27$ 波長分の波面収差に相当するが、波長193nmのArFレーザ光源に対しては $100/193=0.52$ 波長分の波面収差に相当し、同じ大きさの複屈折性を仮定しても、結像特性に与える影響は波長が短い程大きくなることが分かる。中心対称な複屈折性を有する光学硝材については、レンズエレメント毎に異なる複屈折率量を有する硝材を用い、その組み合わせを最適化することによって光学特性への悪影響をある程度軽減できることが特開平8-10706号公報に記載されているが、そのような考え方では、もはや投影光学系に対する高精度化の要求に答えることができなくなっている。そのため、硝材が有する複

屈折性そのものを、何らかの手段でキャンセルすることが必要になっている。

【0020】本発明は、投影光学系の有する複屈折性及び/又は投影露光を行っている過程において生じる複屈折性を良好に補正できる投影光学系及び投影露光装置及びこの露光装置を用いたデバイスの製造方法の提供を目的とする。

【0021】

【課題を解決するための手段】請求項1の発明の投影光学系は、1つ又は複数枚のレンズエレメントを有する投影光学系において、該投影光学系は光軸方向に主軸を有する一軸結晶より成る複屈折補正部材を少なくとも1つ及び/又は該一軸結晶と同等の歪み分布を有する材質より成る複屈折補正部材を少なくとも1つ含み、該複屈折補正部材の特性は、前記レンズエレメントの1つ又は複数で発生する複屈折をキャンセルするように決められることを特徴としている。

【0022】請求項2の発明の投影光学系は、1つ又は複数枚のレンズエレメントを有する投影光学系において、該投影光学系は複屈折補正部材を少なくとも1つ含み、該複屈折補正部材の特性は、前記レンズエレメントの1つ又は複数で発生する複屈折をキャンセルするように決められることを特徴としている。

【0023】請求項3の発明の投影光学系は、複数枚のレンズエレメントを有する投影光学系において、該投影光学系は複屈折可変部材を有することを特徴としている。

【0024】請求項4の発明は請求項1又は2の発明において、前記投影光学系は、像側がテレセントリックな構成であり、最も像側のエレメントとして第1の複屈折補正部材を有し、該投影光学系の絞り位置近辺に第2の複屈折補正部材を有することを特徴としている。

【0025】請求項5の発明は請求項1から4のいずれか1項の発明において、前記複屈折補正部材は平行平板であり、その厚さ及び複屈折的な特性は、前記複数のレンズエレメントで発生する複屈折をキャンセルするように決められていることを特徴としている。

【0026】請求項6の発明は請求項5の発明において、前記複屈折補正部材の材質は $MgF_2$ の単結晶であり、該補正部材は複屈折性を有しない基板上に該基板と一体化して設けてあることを特徴とする。

【0027】請求項7の発明は請求項5の発明において、前記複屈折補正部材の周辺部に複屈折補正量を調整するための応力調整手段を備えたことを特徴としている。

【0028】請求項8の発明は請求項5の発明において、前記複屈折補正部材の材質は $MgF_2$ の単結晶、或いは $CaF_2$ の単結晶、或いは熔融石英であり、その周辺部に応力調整手段を備えていることを特徴としている。

【0029】請求項9の発明の投影露光装置は請求項1から8のいずれか1項の発明の、投影光学系を用いて第1物体面上のパターンを第2物体面上に投影していることを特徴としている。

【0030】請求項10の発明のデバイスの製造方法は請求項9の発明の投影露光装置を用いてレクチルのデバイスパターンでウェハを露光する段階と、該露光したウェハを現像する段階とを含むことを特徴としている。

【0031】

【発明の実施の形態】図1は本発明の実施形態1の投影光学系の要部断面図である。本実施形態はステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式に適用可能なものである。同図においてPLは投影光学系であり、高精度に収差が補正された通常、数十枚の光学エレメントによって構成されるが、それを簡略化してレンズエレメント1～3で代表させて示している。

【0032】ここでレンズエレメント1～3は石英ガラス（溶融石英）を切削、研磨することによって形成されている。4は複屈折補正部材である。5はレクチル、6はウェハである。レクチル5面上のパターンを投影光学系PLによってウェハ6面上にステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式で縮小投影している。

【0033】本実施形態の投影光学系PLは、レンズエレメントの一部に光軸方向に主軸を有する一軸結晶、或いは該一軸結晶と同等の歪み分布を有する光学部材から成る複屈折補正部材4を設け、該複屈折補正部材4の厚さ、表面形状、及び複屈折的な特性を他のレンズエレメントで発生する複屈折をキャンセルするように決めている。

【0034】ここでレンズエレメント1～3を構成する溶融石英は図21を用いて説明した通り、進相軸121の方向が光軸120a（PLa）を中心に放射状に分布する複屈折性を有している。図1では複屈折の影響を説明するためにレクチル5の一点より射出する3本の光線7、8、9を用いている。そして、特に光線7に関してレンズエレメント1に入射する前の偏光成分を10と11によって指定し、次にレンズエレメント3射出後の偏光成分を12と13によって指定する。そして更に、補正部材4からの射出後の偏光成分を14と15によって指定する。ここで、偏光光10、12、14は紙面に平行な方向の偏光成分を表し、偏光光11、13、15は紙面に垂直な方向の偏光成分を表す。

【0035】図1に示すように、レンズエレメント1に入射する前は偏光成分10と11は等しい波面を有する。ところが、3枚のレンズエレメント1、2、3を透過することによって偏光成分12と13の間には波面のずれが生じる。偏光成分12の電場の振動方向はレンズエレメント1～3中では、図20で説明した進相軸方向に一致するので相対的に偏光成分12は偏光成分13よ

りも波面が進むこととなる。そして、このままの状態では像面（ウェハ面）6に達すると結像特性が劣化してしまう。そこで本実施形態では、投影レンズPLの最も像面側の位置に設けた複屈折補正部材4によって偏光成分12と13の間に生じた波面のずれを補正して、波面の一致した2つの偏光成分14と15に変換してウェハ面6に入射させている。

【0036】ここで、補正部材4の光学的作用について図2及び図3を用いて説明する。補正部材4は一軸性の光学結晶から成る厚さdの平行平板であり、その結晶軸（この場合は主軸、及び光学軸に等しい）が投影レンズの光軸PLa方向と一致するようにして用いる。紫外域で高い透過率を有し、かつ物理的な耐久性に優れた一軸性結晶としては、フッ化マグネシウム（ $MgF_2$ ）等を用いることができる。また光線20は補正部材4に垂直に入射し、光線21は補正部材4に角度 $\theta$ をもって入射しているとする。

【0037】まず光線20に対して、入射前の偏光成分を22及び23によって表すと、2つの偏光成分22、23は補正部材4に対して共に常光線（電場振動方向が主軸に垂直）として入射する。そのため、透過後の偏光成分24と25の間に波面のずれは現れない。

【0038】一方、光線21の入射前の偏光成分を26と27により表すと、偏光成分27は常光線として補正部材4を透過するが、偏光成分26は異常光線として補正部材4を透過する。常光線と異常光線の間では補正部材4の材質の屈折率が異なるため、偏光成分28と29で示すように、2つの偏光成分28、29の間には波面のずれ $\Psi(\theta)$ が生じる。

【0039】例えば $MgF_2$ は正結晶であり、異常光線の屈折率 $n_o$ は常光線の屈折率 $n_e$ より大きくなるため、偏光成分28の波面は偏光成分29の波面に比較して相対的に遅れることになる。図3は一軸結晶の屈折率をx-z面で表した屈折率楕円体であり、主軸と角度 $\theta'$ を成す光線の屈折率は常光線に対しては点Aによって、異常光線に対しては点Bによって与えられる。異常光線の屈折率として $\theta' = 90^\circ$ における値を $n_o$ とし、一般の角度 $\theta'$ に対しては $p(e')$ とする。図3からは、異常光線に対する屈折率が結晶内部の光線の方向 $e'$ によって変化する様子がよく分かる。ここで

【0040】

【外1】

$$p(\theta') = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sin^2 \theta' \cos^2 \theta'}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta'}{n_o^2}}} \quad \dots \text{【数式1】}$$

の関係を導くことができる。複屈折による幾何光学的な光線の分離を無視すれば、入射角度 $\theta$ と結晶内の方向 $\theta'$ はスネルの法則 $\sin \theta = n \sin \theta'$ 、但し $n = (n_o + n_e) / 2$ によって関係付けられ、波面のずれ $\Psi(\theta)$ は、

【0041】

【外2】

$$\Psi(\theta) = (\rho(\theta') - n_0) \frac{d}{\cos\theta} \quad \dots \text{〔数式2〕}$$

と表すことができる。これを角度 $\theta$ の関数として図示したのが図4である。

【0042】この結果から、一軸性結晶を用いることにより、光線の入射角度に応じて複屈折により発生する偏光成分間の波面ずれ量が変化することが分かる。図2に示すような正の一軸結晶を用いれば紙面に平行な偏光成分26の波面を垂直な偏光成分27に対して遅らせることができる。このため、図1で偏光成分12と13の間に発生した波面のずれを、補正部材4の透過によって、偏光成分14と15で表されるように補正することが可能となる。ここまでの説明は光線7に対して行ったものであるが、光線9に対しても同様の説明を行うことが可能である。

【0043】また光線8に対しては、レンズエレメント1から3、補正部材4において複屈折的な影響は一切受けないので、常に理想的な状態で物体面5から像面6に導かれる。そして、レンズエレメント1から3で発生する複屈折の影響を図22の $\Phi(\theta)$ で表すことにすれば、図4で表される複屈折補正部材4の複屈折補正量 $\Psi$

$$n_o = \sqrt{1 + \frac{2.31204\lambda^2}{-566.136 + \lambda^2} + \frac{0.39875\lambda^2}{-0.00895189 + \lambda^2} + \frac{0.487551\lambda^2}{-0.00188218 + \lambda^2}}$$

$$n_e = \sqrt{1 + \frac{2.49049\lambda^2}{-163.124 + \lambda^2} + \frac{0.504975\lambda^2}{-0.008823767 + \lambda^2} + \frac{0.41344\lambda^2}{-0.00135738 + \lambda^2}}$$

によって与えられることが示される。但し波長 $\lambda$ の単位は $\mu\text{m}$ である。光源にArFエキシマレーザーを使用する場合、 $\lambda = 0.193\mu\text{m}$ を代入して、常光線屈折率 $n_o = 1.427670$ 、異常光線屈折率 $n_e = 1.4$

$$\Psi(\theta) = \left( -1.42767 + \frac{1}{\sqrt{0.490619 - 0.0044348\sin^2\theta}} \right) \frac{d}{\sqrt{1 - 0.486024\sin^2\theta}}$$

が得られる。像側の開口数が $\text{NA} = 0.7$ の場合を考えると、角度 $\theta$ の最大値は $\sin\theta = 0.7$ より、ほぼ $45^\circ$ となる。 $d = 1\text{mm}$ として、 $0 \leq \theta \leq 45^\circ$ の範囲で $\Psi(\theta)$ の変化を計算すると図5(A)に示す関係が得られる。補正部材4の厚さを $1\text{mm}$ とすることで、投影レンズの周辺部を透過して像面に $45^\circ$ の角度で入射する光線(図1の7と9)に対して、大きさ $0.0037\text{mm}$ の複屈折による波面ずれ補正を行うことが可能となる。ここで、厚さ $d$ と複屈折補正量 $\Psi(\theta)$ は比例関係になることは上式からも明らかである。

【0049】ところで、投影レンズ中において、補正部材4以外の硝材で発生する複屈折による波面ずれは定性的には図23の関数 $\Phi(\theta)$ によって表されることは前述の通りであるが、具体的な値としては、図1中の光線

( $\theta$ )との間で、 $\Phi(\theta) - \Psi(\theta) = 0$ の関係を満たすように設定することが可能となる。

【0044】本実施形態では以上説明した理由により、補正部材4により硝材の複屈折の影響を補正して投影レンズが本来有している結像特性を発揮できるようにしている。

【0045】投影レンズPL用の硝材の影響で発生した複屈折を打ち消すには、補正部材4で発生する波面のずれ量を制御することが必要となる。そのためには、異常光線と常光線の屈折率の差 $n_e - n_o$ の値、あるいは厚さ $d$ を変化させればよい。但し、補正部材4を例えば $\text{MgF}_2$ で構成することにすれば、屈折率の差 $n_e - n_o$ の値は自動的に決まるため、板厚のパラメータ $d$ のみがパラメータとなる。

【0046】ここから先は補正部材4に $\text{MgF}_2$ を用いることを前提として、板厚 $d$ の決定について説明を行う。HANDBOOK OF OPTICS II Second Edition (ISBN 0-07-047974-7) Chapter 33 (33.64頁)記載のデータによると、 $\text{MgF}_2$ の屈折率波長依存性は、常光線、異常光線に対して、それぞれ

【0047】

【外3】

41134となる。これらの値を前述の〔数式1〕を介して〔数式2〕に代入することにより、

【0048】

【外4】

7、9が透過する位置での硝材の複屈折量を $2\text{nm/cm}$ 、光線7、9が硝材の中を通過する長さの合計を $50\text{cm}$ として、偏光成分12、13間の波面ずれ量は $100\text{nm}$ 程度となる。補正部材4の厚さを $1\text{mm}$ として $0.0037\text{mm}$ 複屈折による波面ずれ補正が可能であることから、 $100\text{nm}$ の波面ずれを補正するには、補正部材4の厚さ $d$ は約 $27\mu\text{m}$ となる。このような薄い部材を単独で投影レンズ中に保持することは不可能であるため、本実施例では、図5(B)に示すように、厚さ $d$ の $\text{MgF}_2$ を透明基板上に設ける構成としている。具体的には、熔融石英、 $\text{CaF}_2$ 等の複屈折性を示さない基板上に $\text{MgF}_2$ を蒸着することにより所望の構成が実現可能となる。複屈折の影響を除いて考えれば、 $\mu\text{m}$ オーダーの厚さ $d$ の変化が光学系の収差に与える影響は無



視できるため、実際に投影光学系において発生した複屈折の大きさに基づいて、補正部材4の厚さ $d$ を決定することが可能となる。

【0050】補正部材 $d$ の厚さを調整する以外に、 $MgF_2$ 結晶が本来有している常光線屈折率 $n_o = 1.427670$ と異常光線屈折率 $n_e = 1.441134$ の差を力学的な手段によって変化させ、複屈折の補正量を調整することも可能である。図6には、補正部材4の周囲に応力調整手段30を設けた構成を示す。 $MgF_2$ は正の一軸結晶であるが、円形状の平板の周囲から一様に内側方向に力を加えることにより、屈折率の差 $n_e - n_o$ の値を小さくすることが可能となる。その方法によれば、板厚 $d$ を一定に保ったまま、屈折率の差 $n_e - n_o$ の大きさを変化させることにより複屈折の補正能力を可変とできる。応力調整手段30は補正部材4の周辺に固着された金属製のベルトであり、ネジ31により、補正部材4の周辺部に対して一様に、内側方向に力を加える働きをする。

【0051】以上で述べた方法を適用すれば、例えば元々複屈折性を示さない $CaF_2$ 、熔融石英等の硝材に対して、一軸結晶と同等の複屈折的な特性を与えることが可能となり、投影レンズの他のレンズエレメントで発生した複屈折性の補正能力を広い範囲で連続的に可変とすることができる。

【0052】本実施形態では、投影レンズを構成するレンズエレメントは、光軸方向に放射状に広がる進相軸分布を有している(図21)として説明を行ったが、進相軸が光軸に関して同心円状に分布している場合には、補正すべき複屈折の符号が逆になり、補正部材4には負の一軸結晶を用いることが必要となる。但し、紫外域で高い透過率を有し物理的な強度等の条件を満たす負の一軸結晶は存在しない。そこで図5を用いて説明した方法により、熔融石英、 $CaF_2$ 等、通常は複屈折を示さない硝材を用いて、平板の周辺部において内向きに一樣な力を加えることにより負の一軸結晶と同等の働きが実現される。

【0053】また、補正部材4としては、ここまでの説明では全て平行平板であるとしてきたが、屈折率の調整のみではキャンセルが不可能な微妙な複屈折性の補正のために、表面を球面、或いは非球面の形状に加工して用いても良い。

【0054】図7は本発明の実施形態2の要部概略図である。本実施形態は図1の実施形態1の改良である。本実施形態2は図1の本実施形態1に比べて、像面側の最終面とウェハ面との間に設けられた補正部材4に加えて、絞り41の近傍に第2の複屈折補正部材42を備えていることが異なっている。

【0055】実施形態1では、物点及び像点は撮影レンズPLの光軸上に存在するとして説明を行った。投影露光装置においては、像側がテレセントリックな構成とな

っている投影光学系が多く用いられている。この投影光学系においては、図8に示すように、像高によらずに各像高での主光線50、51は平行平板4に垂直に入射し、その周りの光線の広がりも像高によって変化することはない。そのため基本的には、実施形態1で説明した方法により、軸上物点と同時に軸外物点に対する複屈折性も補正されることになる。

【0056】しかしながら、図7において、光軸43の上に存在しない物点P1から像点P2に向かう3本の光線44、45、46に対する複屈折の影響は、以下の点で軸上物点に対する影響とは異なってくる。まず、主光線45に対しては、常に複屈折がゼロである投影レンズPLの光軸43上を通過するわけではないので、偏光方向の違いによる波面のずれが発生する。また、光線44は、光線46に比較して複屈折の値が大きなレンズの周辺部を通過するので、結果として複屈折の影響も大きく現れる。そのため、レンズエレメント1、2、3の影響のみを考えると、紙面に平行方向の偏光成分44P、45P、46Pと紙面に垂直方向の偏光成分44S、45S、46S間に現れる波面のずれ $\Psi(\theta)$ は図9のようになる。補正部材4により補正可能な複屈折性は、基本的に $\theta = 0$ の主光線に対しては大きさゼロ、そして分布形状が左右で対称なものに限られるので、図9の分布に対しては十分な補正を行うことができない。

【0057】そこで本実施形態では、第2の複屈折補正部材42により、軸外物点P1からの光束に対して、図9に示す波面のずれ $\Psi(\theta)$ の分布を図10に示す $\Psi'(\theta)$ 形に変換している。ここで第2の補正部材42は、補正部材4と同様、結晶軸(ここでは主軸、及び光学軸に等しい)が光軸方向を向くように配置された一軸性光学結晶、或いは一軸結晶と同等の性質を有する硝材である。3本の光線44、45、46は補正部材42に対してほぼ等しい角度で入射するため、図9に示した波面のずれ $\Psi(\theta)$ の分布をずれ量 $\Delta$ だけ一様に引き下げる効果を示す。ここでずれ量 $\Delta$ の大きさは補正部材42の厚さ、或いは補正部材42が有する複屈折の大きさにより調整可能なことは、実施形態に1において補正部材4について説明した通りである。

【0058】また、補正部材42によって補正すべき複屈折の大きさは、実際には光軸43からの物点P1の距離 $h$ によって変化する。距離 $h$ の値が変化すると物点P1から発した光束が補正部材42に対して入射する角度が変化するため、補正部材42による複屈折の補正量も自動的に変化する。そのため全ての物体高において、最適な補正が実現されるように光学系を構成することが可能となる。光軸43上を発した物点からの光束は、補正部材42に対してほぼ垂直に入射するため、補正部材42においては複屈折の補正量はゼロとなり、その場合には、補正部材4によってのみ、複屈折の影響が補正されることになる。

【0059】以上説明したように、補正部材（第1補正部材）4と補正部材（第2補正部材）42を組み合わせて用いることによって、軸外物点に対して発生した複屈折の影響も、高精度に補正することが可能となる。但し軸外物点に対しては、図10にも示すように、補正部材42によっても主光線の周りの分布の非対称性は完全には補正されていない。

【0060】そこで図11に示すように、補正部材42を光線44、45、46が収束光束となっている部分に用いることにしている。光線44、45、46が補正部材42に入射する角度をそれぞれ $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ で表すことにすれば、 $\alpha 1 > \alpha 2 > \alpha 3$ の関係となるため、複屈折の補正量に関しては光線44に対して最も大きく、そして光線46に対して最も小さくなるように設計することが可能となる。

【0061】その結果、図9で示した分布 $\Psi(\theta)$ を、図11に分布 $\Psi'(\theta)$ として示すように、主光線の周りにほぼ完全に対称な分布に変換することが可能となる。そして、補正部材4と組み合わせれば、軸外物点に対しても軸上物点同様の高精度な補正が可能となる。尚、補正部材として2以上の補正部材を用いて各々複屈折を補正するようにしても良い。

【0062】次に図13は、本発明の投影光学系をステップに搭載した実施形態3の要部概略図である。図13において60は回路パターンの描かれたレチクルであり、61は本発明に係る投影光学系、62は該回路パターンが転写されるウェハである。照明系67からの照明光束63はレチクル60上の照明領域64を照明し、その領域64に描かれている回路パターンが投影光学系61を介して、ウェハ62上の露光領域65に縮小転写される。ステップにおいては、レチクル60上のパターンがウェハ62上に一括して縮小転写された後は、ウェハ62は所定の量だけステップして再び露光を行うということを繰り返す。投影光学系61は、本発明による複屈折補正部材を備えており、硝材が有する複屈折の影響を補正して高精度な結像を実現することが可能としている。

【0063】次に図14は、本発明の投影光学系をステップ&スキャン型の露光装置に搭載した実施形態4の要部概略図である。同図において70は回路パターンの描かれたレチクルであり、71は投影光学系、72が該回路パターンが転写されるウェハである。照明系67からの照明光束73はレチクル70上の照明領域74を照明し、その領域74に描かれている回路パターンが、投影光学系71を介して、ウェハ72上の露光領域75に縮小転写される。ステップ&スキャン型の露光装置は以下の点で従来のステップとは異なる。

【0064】ステップにおいては、レチクル70上のパターンをウェハ72上に一括して縮小転写していたが、ステップ&スキャン型の露光装置ではスリット形状の照

明領域74で回路パターンを照明し、レチクル70、ウェハ72を同期をとってスキャンすることによりレチクル70上の回路パターン全体を縮小転写するようにしている。投影光学系71は、本発明による複屈折補正部材を備えており、硝材が有する複屈折の影響を補正して高精度な結像を実現することが可能としている。

【0065】次に上記説明した投影露光装置を利用した半導体デバイスの製造方法の実施形態を説明する。

【0066】図15は半導体デバイス（ICやLSI等の半導体チップ、或いは液晶パネルやCCD等）の製造フローを示す。

【0067】ステップ1（回路設計）では半導体デバイスの回路設計を行なう。ステップ2（マスク製作）では設計した回路パターンを形成したマスクを製作する。

【0068】一方、ステップ3（ウェハ製造）ではシリコン等の材料を用いてウェハを製造する。ステップ4（ウェハプロセス）は前工程と呼ばれ、前記用意したマスクとウェハを用いてリソグラフィ技術によってウェハ上に実際の回路を形成する。

【0069】次のステップ5（組立）は後工程と呼ばれ、ステップ4によって作製されたウェハを用いて半導体チップ化する工程であり、アセンブリ工程（ダイシング、ボンディング）、パッケージング工程（チップ封入）等の工程を含む。

【0070】ステップ6（検査）ではステップ5で作製された半導体デバイスの動作確認テスト、耐久性テスト等の検査を行なう。こうした工程を経て半導体デバイスが完成し、これが出荷（ステップ7）される。

【0071】図16は上記ウェハプロセスの詳細なフローを示す。ステップ11（酸化）ではウェハの表面を酸化させる。ステップ12（CVD）ではウェハ表面に絶縁膜を形成する。

【0072】ステップ13（電極形成）ではウェハ上に電極を蒸着によって形成する。ステップ14（イオン打込み）ではウェハにイオンを打ち込む。ステップ15（レジスト処理）ではウェハに感光剤を塗布する。ステップ16（露光）では前記説明した露光装置によってマスクの回路パターンをウェハに焼付露光する。

【0073】ステップ17（現像）では露光したウェハを現像する。ステップ18（エッチング）では現像したレジスト以外の部分を削り取る。ステップ19（レジスト剥離）ではエッチングがすんで不要となったレジストを取り除く。これらのステップを繰り返し行なうことによってウェハ上に多重に回路パターンが形成される。

【0074】本実施形態の製造方法を用いれば、従来は製造が難しかった高集積度の半導体デバイスを容易に製造することができる。

【0075】

【発明の効果】本発明によれば、複屈折補正部材により、投影光学系の複屈折性を良好に補正できる。



【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態1による投影光学系の要部概略図である。

【図2】本発明に係る複屈折補正部材の透過における偏光状態変化の説明図である。

【図3】正の一軸結晶硝材における複屈折楕円面の説明図である。

【図4】複屈折補正部材に対する入射角と複屈折補正能力の関係の説明図である。

【図5】(A)は複屈折補正量具体例を示す説明図で、(B)は透明基板上に複屈折補正部材を一体化して設ける構成を示す図である。

【図6】複屈折補正部材における複屈折補正能力調整手段の説明図である。

【図7】本発明の実施形態2による投影光学系の要部概略図である。

【図8】軸外物点に対する光線分布の説明図である。

【図9】軸外物点に対する複屈折の影響の説明図である。

【図10】第2の複屈折補正部材の効果の説明図である。

【図11】第2の複屈折補正部材を収束光束中で用いる場合の光線の入射角度の説明図である。

【図12】第2の複屈折補正部材の効果を説明する図である。

【図13】本発明の投影光学系を適用したステッパの実施形態3の要部概略図である。

【図14】本発明の投影光学系を適用したスキャナの実施形態4の要部概略図である。

【図15】本発明のデバイスの製造方法のフローチャートである。

【図16】図15のウェハプロセスのフローチャートである。

【図17】硝材の製造工程の説明図である。

【図18】硝材製造工程に起因する内部応力分布の発生の説明図である。

【図19】コンパクションの発生の説明図である。

【図20】コンパクションに起因する内部応力分布の発生の説明図である。

【図21】光軸に関して対称に発生した複屈折の説明図である。

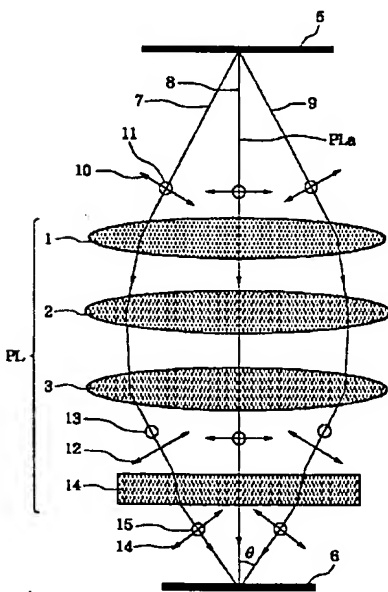
【図22】複屈折が光束の偏光状態に与える影響の説明図である。

【図23】光線の角度と複屈折の影響の大きさの関係の説明図である。

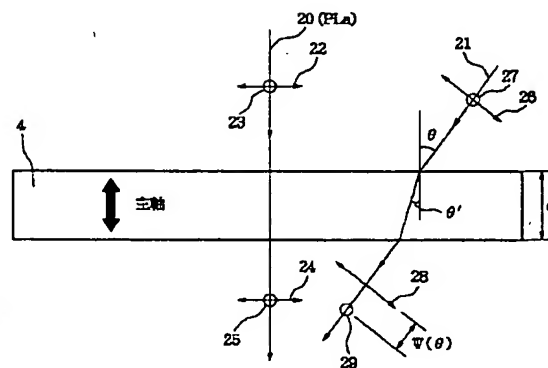
【符号の説明】

- 1, 2, 3 レンズエレメント
- 4, 42 複屈折補正部材
- 5 第1物体(レチクル)
- 6 第2物体(ウェハ)
- 7, 8, 9 光線
- PL 投影光学系
- 30 応力調整手段
- 31 ネジ

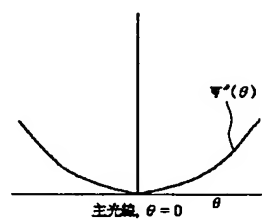
【図1】



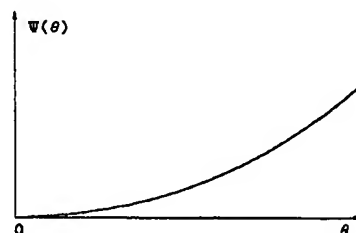
【図2】



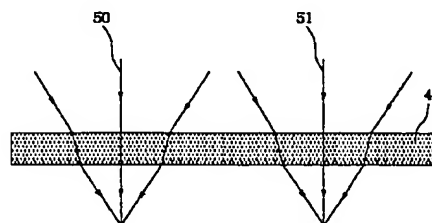
【図12】



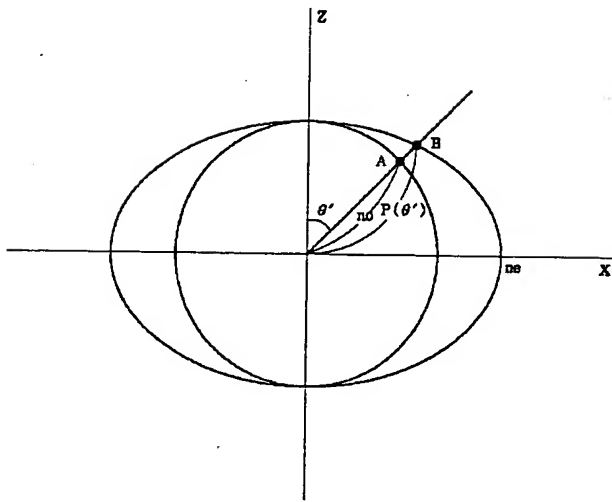
【図4】



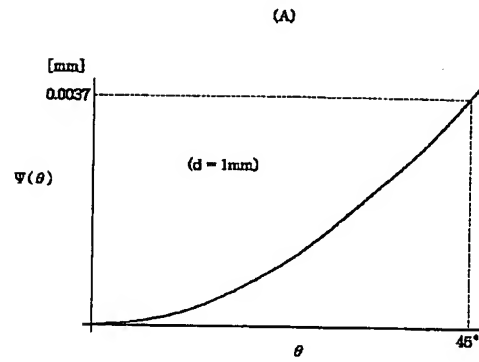
【図8】



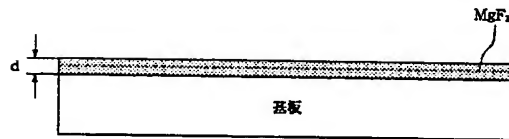
【図3】



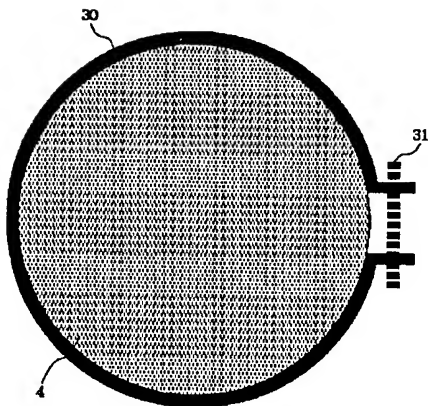
【図5】



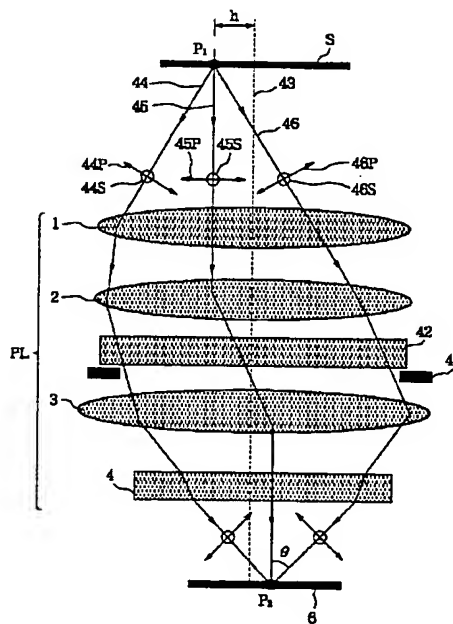
(B)



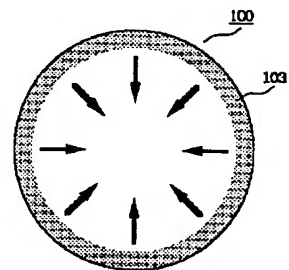
【図6】



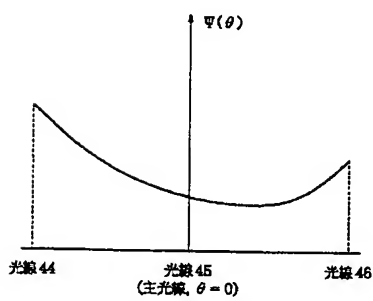
【図7】



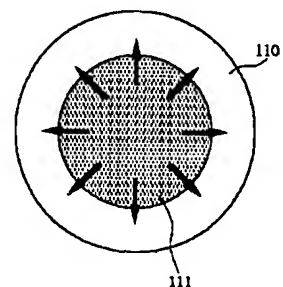
【図18】



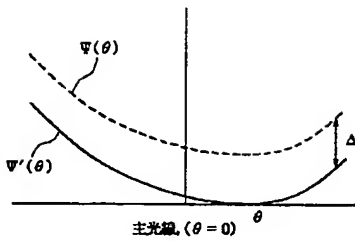
【図9】



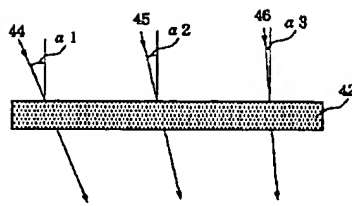
【図20】



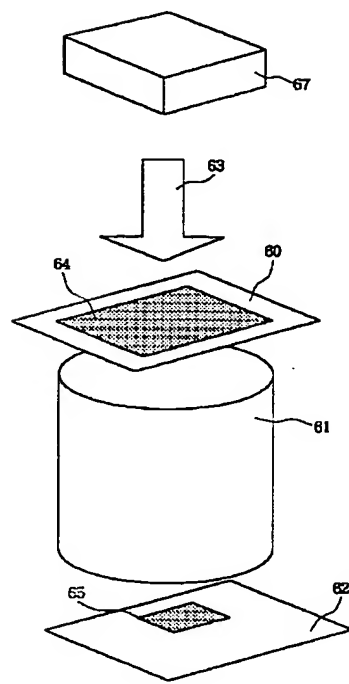
【図10】



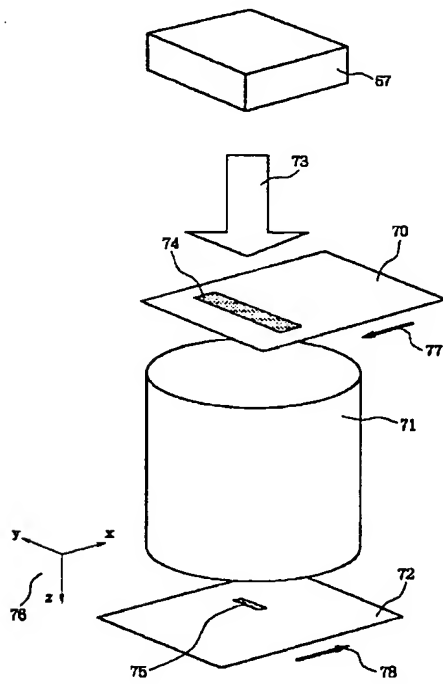
【図11】



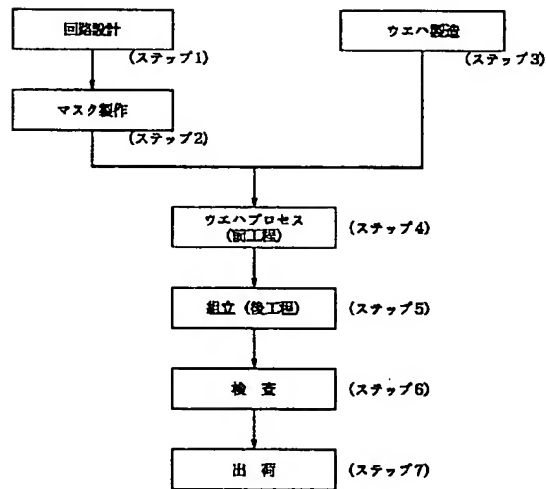
【図13】



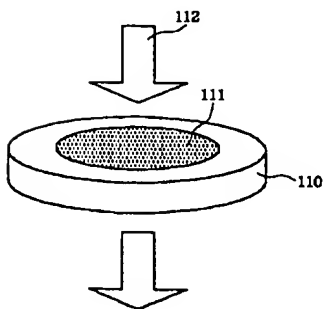
【図14】



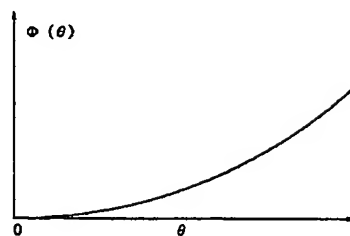
【図15】



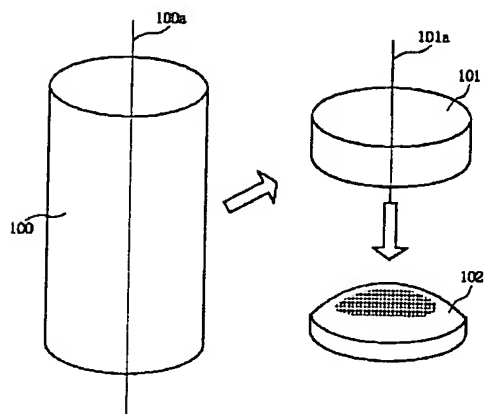
【図19】



【図23】



【図17】



【図22】

